

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 32020101152683

UDC_____

厦门大学

硕 士 学 位 论 文

绳牵引并联支撑系统仿真分析
与测力系统应用研究

Simulation Analysis and Force-measuring System
Research Of Wire-driven Parallel Suspension System

陈 艺 新

指导教师姓名: 林 麒 教授

专 业 名 称: 航空宇航制造工程

论文提交日期: 2013 年 月

论文答辩时间: 2013 年 月

学位授予日期: 2013 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2013 年 5 月

厦门大学博硕士论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学博硕士论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士论文摘要库

摘 要

作为一种新型的低速风洞模型支撑系统，绳牵引并联机构因具有速度快、惯性小、承载能力大以及对流场干扰小等诸多优点而备受关注。但是由于该类系统具有冗余驱动的特点，如何优化分配绳系拉力以及如何精确测量飞行器模型所受气动载荷成为待解决的关键技术。本文重点对这两方面问题展开研究，主要工作及成果如下所述。

首先，建立了 WDPSS-8 的运动学模型和动力学模型。由于冗余驱动引入了过约束，其高度耦合的非线性系统必须有冗余驱动力才能实现力闭合，导致绳拉力是多解的。论文在动力学模型分析的基础上提出一种基于罚函数算法的绳拉力优化求解方案，并在 MATLAB 环境下进行了仿真，仿真结果表明非线性规划方法对绳拉力优化分配的合理性。

其次，在 ADAMS 环境下对 WDPSS-8 的运动学和工作空间进行分析。论文计算了该机构的运动学逆解和正解，规划飞机模型做螺旋线组合运动的轨迹；求解出飞机模型在纯俯仰、偏航和滚转振荡运动下的工作空间，并对为增大俯仰工作空间而设计的两种时变结构方案进行了验证，仿真结果表明所提方案是合理的。

接着，搭建了 WDPSS-8 的绳系拉力测量系统，改进测力系统的采集程序，并对所搭建的测力系统进行测试标定；同时选取合适的牵引绳，测定其弹性模量。

最后，将 WDPSS-8 样机放置在某一开口式回流低速风洞中进行吹风试验。在测得模型处于不同风速、不同姿态角、不同运动规律下各绳的拉力数据后，给出处理数据的方法，并解算出模型的相关空气动力载荷参数。试验结果表明，绳牵引并联机构用于风洞试验的模型支撑是可行的。

本文的研究工作为绳牵引并联机构的受力分析以及运动控制提供了理论和实践基础，对后续绳牵引并联机构的深入研究具有借鉴意义。

关键词：绳牵引并联机构；绳拉力优化；ADAMS；测力系统；风洞试验

ABSTRACT

As a new type of model support system for low-speed wind tunnel, wire-driven parallel mechanism has attracted much attention. It has high movement speed, low inertia, large carrying capacity, and little interference in flow field and so on. However, this kind of system also has the characteristic of redundant drive. So how to optimize the allocation of wire tensions and how to measure the aerodynamic loads of aircraft model accurately become the key technology to be solved. In this paper, these two problems were studied. The main work and results are as follows:

Firstly, a kinematic model and a dynamic model have been built for a 6-DOF wire-driven parallel manipulator support system named WPDSS-8. Since the redundant drive introduces over-constrain, highly coupled nonlinear system must have redundant driving force to achieve force closure. So there are multiple solutions to wire tension. A wire tension optimization program based on penalty function has been proposed on the basis of the kinetic model and simulated in MATLAB. Simulation results show that using nonlinear programming method to optimize the allocation of the wire tensions is reasonable.

Secondly, the kinematics and workspace of WDPSS-8 have been analysed in ADAMS to calculate the forward and inverse kinematics solutions. A trajectory planning for the aggregate motion of helical line has been discussed. The workspaces of aircraft model in pure pitch, yaw and roll oscillating movement have been solved, and two time-varying structure concepts designed for increasing the pitch workspace also have been verified. The simulation results show that the scheme proposed is reasonable.

Then, a force-measuring system has been built for WDPSS-8. The main work is to improve the data acquisition and processing program and to conduct the testing calibration for measuring system. An appropriate wire has been chosen at the same time and its elastic modulus has been determined by testing.

Finally, the WDPSS-8 prototype has been placed in an opening reflux low speed wind tunnel to for wind tunnel test. After obtaining each wire's tensions which are under different wind speeds, different attitude angles and different laws of motion, two methods of processing data have been given. Thus the aerodynamic load parameters can be calculated easily. The test results show that the wire-driven parallel mechanism for wind tunnel test model support is feasible.

This research work has provided a theoretical and practical basis of force analysis and motion control for the wire-driven parallel mechanism. It has provided a reference for the further study of wire-driven parallel mechanism.

Key Words: Wire-driven parallel mechanism; Wire-tension optimization; ADAMS; Force-measuring system; Wind tunnel test.

目 录

第一章 绪论	1
1.1 绳牵引并联机构的研究概况	1
1.2 本文研究的背景及主要内容	5
第二章 绳牵引并联机构的数学建模与绳拉力优化分析	9
2.1 绳牵引并联机构及其结构参数	9
2.2 机构运动学模型	12
2.3 机构动力学模型	14
2.4 绳拉力优化设计	15
2.4.1 罚函数算法	16
2.4.2 静态试验绳拉力仿真	18
2.4.3 动态试验绳拉力仿真	19
2.5 本章小结	23
第三章 绳牵引并联机构的运动学与工作空间分析	25
3.1 ADAMS 软件简介	25
3.2 ADAMS 模型建立	26
3.3 机构的运动学仿真	27
3.3.1 运动学逆解	27
3.3.2 运动学正解	30
3.3.3 螺旋线的组合运动	31
3.4 机构的工作空间分析	33
3.4.1 机构工作空间计算	33
3.4.2 时变结构方案分析	36
3.5 本章小结	42
第四章 绳牵引并联机构测力系统的搭建	43
4.1 测力系统的硬件组成	43
4.1.1 拉力传感器的选用	44
4.1.2 放大器的设计	46

4.1.3 激励电源的制作	52
4.2 测力系统的软件部份	55
4.2.1 采集程序用户界面	55
4.2.2 采集程序算法设计	56
4.3 测力系统的标定	58
4.3.1 标定方法	58
4.3.2 标定结果	59
4.4 牵引绳的选取与标定	61
4.5 本章小结	63
第五章 测力系统的风洞试验应用研究	64
5.1 风洞试验	64
5.1.1 风洞与飞机模型	64
5.1.2 试验目的与内容	65
5.2 风洞试验数据处理	67
5.2.1 静态试验数据的处理方法	67
5.2.2 动态试验数据的处理方法	69
5.3 风洞试验结果与分析	71
5.3.1 吹风试验各绳拉力变化	71
5.3.2 试验数据与仿真数据的比较	74
5.3.3 气动参数曲线	76
5.4 本章小结	78
第六章 总结与展望	79
6.1 总结	79
6.2 展望	80
附 录	82
参 考 文 献	85
攻读学位期间发表的成果目录	94
致 谢	95

Table of Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 General situation of wire-driven parallel manipulator	1
1.2 Background and main content of paper	5
Chapter 2 Mathematical modeling and wire-tension optimization	9
2.1 Structure paramaters of manipulator	9
2.2 Kinematic model of WDPSS-8	12
2.3 Dynamic model of WDPSS-8	14
2.4 The optimization design of wire tension	15
2.4.1 Penalty function algorithm	16
2.4.2 Wire tension simulation in static test	18
2.4.3 Wire tension simulation in dynamic test	19
2.5 Brief summary	23
Chapter 3 Analysis of kinematics and workspace	25
3.1 Brief introduction of ADAMS	25
3.2 ADAMS modeling	26
3.3 Kinematic simulation	27
3.3.1 Inverse kinematics	27
3.3.2 Positive solutions to kinematics	30
3.3.3 Aggregate motion of helical line	31
3.4 Workspace analysis	33
3.4.1 Caculation of workspace	33
3.4.2 Time-varying analysis	36
3.5 Brief summary	42
Chapter 4 Construction of force measuring system	43
4.1 Hardware structure	43
4.1.1 Choice of tension sensors	44
4.1.2 Design of amplifier	46

4.1.3 Manufacture of excitation power supply	52
4.2 Software structure	55
4.2.1 System UI	55
4.2.2 Algorithm design of acquisition program	56
4.3 Calibration of system	58
4.3.1 Calibration method	58
4.3.2 Calibration result	59
4.4 Choice and calibration of hauling wire	61
4.5 Brief summary	63
Chapter 5 Apply the force measuring system to wind tunnel test	64
5.1 Wind tunnel test	64
5.1.1 Wind tunnel and aircraft model	64
5.1.2 Test purposes and content	65
5.2 Data processing of wind tunnel test	67
5.2.1 Processing method to static test	67
5.2.2 Processing method to dynamic test	69
5.3 Wind tunnel test results and analysis	71
5.3.1 Variation of each wire tension	71
5.3.2 Data comparison between test and simulation	74
5.3.3 Aerodynamic parameter curves	76
5.4 Brief summary	78
Chapter 6 Conclusions and prospect	79
6.1 Conclusions	79
6.2 Prospect	80
Appendices	82
References	85
Publications	94
Acknowledgments	95

厦门大学博硕士论文摘要库

第一章 绪论

1.1 绳牵引并联机构的研究概况

作为一种新型的并联机器人，绳牵引并联机构既有并联运动机构的高刚度、高精度、高速度、承载能力大等优点，又有绳索驱动机构的驱动源固定、重量轻、惯性小等优点。从 20 世纪 80 年代初至今，绳牵引并联机构已逐渐成为国内外研究的一大热点，广泛应用于航空、工业和军事等领域^[1,2]。

早在1984年，Landsberger等人就提出了绳牵引并联机器人的设计问题^[3]，早期主要是有关绳牵引并联机器人在集装箱吊装方面的应用，包括定位分析、刚度分析和工作空间分析等。1989年，Dagalakis成功研制出带有串联子系统的绳牵引并联机构Robotrane，提出用于起重设备的绳牵引并联机器人，并对其工作空间、刚度和结构设计等进行了分析^[4]。此后，绳牵引并联机构理论得到了进一步发展。由于绳只能受拉不能受压，Ming A和Higuchi T指出绳牵引并联机构必须采取冗余驱动的方法，即 n 自由度绳牵引并联机构至少需由 $n+1$ 根绳牵引。Ming A同时给出完全约束定位机构CRPMs（Compeletely Restrained Positioning Mechanisms）的基本分类，提出不完全约束定位机构IRPMs（Incompeletely Restrained Positioning Mechanisms）需要外力（如重力）来保持稳定性，并且构建出CRPMs构型原理样机，对其控制问题进行了研究^[5]。

日本是研究绳牵引并联机构比较早和比较多的国家之一，其研究人员对绳牵引并联机构的研究始于 1988 年。Kawamura 等人于 1995 年提出了一种由 7 绳牵引的力传递性能好、工作空间大的六自由度并联机构 FALCON（FASt Load CONveyance），该机构具有极高的加速度；同时，Kawamura 还对 FALCON 机构中绳索引发的振动问题做了初步研究^[6]。Morizono 随后对 FALCON-7 绳牵引并联机构进行了超高速控制分析、刚度分析和工作空间分析^[7]，Takeda 则对该类型的绳牵引并联机构进行了力传递性能方面的分析^[8]。

近年来绳牵引并联机构的理论和应用发展迅猛。1999 年 Kiyoshi 根据在绳牵引并联机构中动平台必须产生大量力和力矩并且绳索之间不能相互接触的条件，从机构的工作空间出发设计出了一种 WARP（Wirepuller-Arm-driven Redundant Parallel），并通过校准机构运动学相关参数来补偿原理样机的加工和装配误差^[9]。

2000 年, Kawamura 运用 Lyapunov 方程对运动稳定性进行了分析, 利用矢量封闭原理以及 PD 反馈调节使执行器的位置方向以及内力收敛到相应的期望值; 同时对绳牵引并联机构的非线性弹性问题进行研究, 提出了一种减少机构振动的方法, 使机构在 60W 电机驱动下不仅不发生振动, 而且加速度可以达到 40g 以上, 最大速度 13m/s^[10]。Voglewede 注意到绳牵引并联机构与多指抓取机构都只能给执行器施加单向的力, 成功建立起特定绳牵引并联机构与带摩擦抓取机构之间的联系, 开创性的把适用于抓取机构的对心抓取定理应用到绳牵引并联机构上, 为把其他相关理论应用到绳牵引并联机构上提供新的思路, 丰富了绳牵引并联机构的理论^[11]。新墨西哥州立大学的 Ou Ma 初步研究了绳牵引并联机构在航天器或者机器人系统微重力动力学和接触动力学的硬件在环仿真器上的应用, 主要是对机构逆运动学问题以及机构刚性和振动问题的研究^[12]。Fumiaki 则是把绳牵引并联机构应用到城市地震灾害的人员搜索和信息采集中, 开发了空中气球绳牵引并联机器人^[13]。

对于工作空间的分析, 一直以来都是绳牵引并联机构研究的重要课题。法国国家宇航研究局 (ONERA) 的 Pascal 和 Michel 在 2003 年通过一种空间三自由度并联机器人对绳牵引并联机构的设计步骤进行归纳, 提出了基于草图的机构设计方法, 并对机构的理论工作空间进行了研究, 阐述基于草图设计绳牵引并联机构的简易性^[14]。2004 年, 美国乔治亚理工学院的 Paul 为了分析绳牵引并联机器人的理论框架, 对系统控制的扰动鲁棒性以及工作空间进行了深入研究, 证明工作空间的边界可以由简单的几何学快速得出^[15]。2004 年, 新加坡南洋理工大学的 Pham 等人在建立绳牵引并联机构可控工作空间的同时, 把张力约束和刚度条件也考虑进去, 利用单纯性法得到 CDPPM (Cable-Driven Planar Parallel Manipulator) 的最优工作空间^[16]; 2006 年 Pham 又提出利用检查牵引绳力旋量封闭条件的方法对机构的力旋量封闭工作空间进行求解。为评价力旋量封闭质量, Pham 引入了反映各绳之间拉力分布的拉力因子 TF (Tension Factor), 总结出力旋量封闭工作空间的求解可以通过递归降维缩减法来完成^[17,18]。

绳牵引并联机构的牵引绳被认为是没有质量且不可伸长的, 但是对于大工作容积的应用, 绳的质量却不能忽略。在 2006 年, Kozak 提出一种计算均匀弹性绳索静态位移的方法, 解决了一般绳牵引并联机器人的逆运动学问题并推导出绳

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库